

## 省工程防食材料の比較検証試験

石橋正博<sup>1)</sup> 田中誠<sup>2)</sup> 政門哲夫<sup>3)</sup>

### 1. はじめに

首都高速道路における鋼橋の損傷の多くは、疲労き裂および腐食によるものである。腐食損傷については、伸縮継手からの漏水が原因となり、部分的かつ小規模な腐食が点在して発生しているものが多くの割合を占めている（写真-1）。これら腐食損傷の補修には、通常、高架下の街路を交通規制し、機械足場にて補修を行っている。しかし、腐食損傷の多い鋼橋の桁端部は表-1 に示す塗装仕様により補修を行っており、塗膜総数が5層と多く施工工程に時間を要している。また、交通規制回数も多いことから施工費用が増加傾向にある。このままでは、増え続ける腐食損傷の補修が進捗せず、予算も限られていることから、各種の省工程防食材料を試験的に使用した補修が平成 23 年頃より開始された。

表-1 桁端部塗装塗替仕様



写真-1 腐食損傷状況

| 塗装系   | 素地調整      | 工程    | 塗料名      | 塗料規格  | 使用量 g/m <sup>2</sup> | 回数 | 塗装方法 | 塗装間隔 |
|-------|-----------|-------|----------|-------|----------------------|----|------|------|
| NS-P3 | 3種        | 下塗    | 変性エポキシ   | SDK   | (200)                | 1  | はけ   | ×    |
|       |           | 第1層   | 樹脂塗料下塗*  | P-414 |                      |    |      | 1日   |
|       |           | 下塗    | 変性エポキシ   | SDK   | 200                  | 1  |      | ~10日 |
|       |           | 第2層   | 樹脂塗料下塗   | P-414 |                      |    |      | 1日   |
|       |           | 下塗    | 超厚膜形エポキシ | SDK   | 500                  | 1  |      | ~10日 |
|       |           | 第3層   | 樹脂塗料下塗   | P-418 |                      |    |      | 1日   |
| 下塗    | 超厚膜形エポキシ  | SDK   | 500      | 1     | ~10日                 |    |      |      |
| 第4層   | 樹脂塗料下塗    | P-418 |          |       | 1日                   |    |      |      |
| 中上    | 厚膜型ポリウレタン | SDK   | 230      | 1     | ~10日                 |    |      |      |
| 兼用    | 樹脂塗料上塗    | P-432 |          |       | ×                    |    |      |      |

しかし、省工程防食材料にて補修した箇所が、数年後に腐食する状況が確認され始めた。そのため、各省工程防食材料の耐久性評価を実施し、より耐久性のある省工程防食材料を選定することを目的として耐久性比較検証試験を実施した。

耐久性比較検証試験は、複合サイクル試験にて実施した。複合サイクル試験の評価は、弊社の土木材料共通仕様書にサイクル数 30 日（720 時間）において、塗膜に異常がないこと、さび・ふくれ幅が 4.0 mm 以下との規定があるが、今回はより耐久性のある省工程防食材料を選定するために、サイクル数を最大 180 日（4,320 時間）まで実施し、比較検証を行った。試験片は、塗装塗替を想定して試験片を一度腐食させ、素地調整を 1 種または 3 種したものに省工程防食材料を塗布して実施した。省工程防食材料は、東京西局管内で使用実績のある 5 種類の塗料と使用実績のないセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料を使用して実施した。本稿は、これら省工程防食材料の耐久性比較検証試験の結果を報告するものである。

1) 首都高速道路(株) 東京西局 〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-16-3

2) 首都高メンテナンス西東京(株) 〒144-0041 東京都大田区羽田空港 1-13-1

3) 日本エンジニアリング(株) 〒230-0046 神奈川県横浜市鶴見区小野町 61 番 1 号

## 2. 比較検証試験概要

### (1) 試験概要

省工程防食材料の耐久性評価は、複合サイクル試験にて行った。複合サイクル試験は、一定時間塩水を噴霧した後、乾燥及び湿潤工程に移行し、塩水噴霧を連続で行わない試験方法であり、実環境に近似した試験方法と言われている。また、弊社の土木材料共通仕様書においても塗料の評価方法として、複合サイクル試験が設定されており、これは JIS K 5600-7-9 塗料一般試験方法・第7部塗膜の長期耐久性・第9節サイクル腐食試験方法・附属書1（規定）サイクルDと同様である。試験サイクルは、図-1に示すとおり5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧、95%の湿潤及び温度が異なる2種類の乾燥サイクルで構成され、1サイクルあたりの所要時間は6時間である。

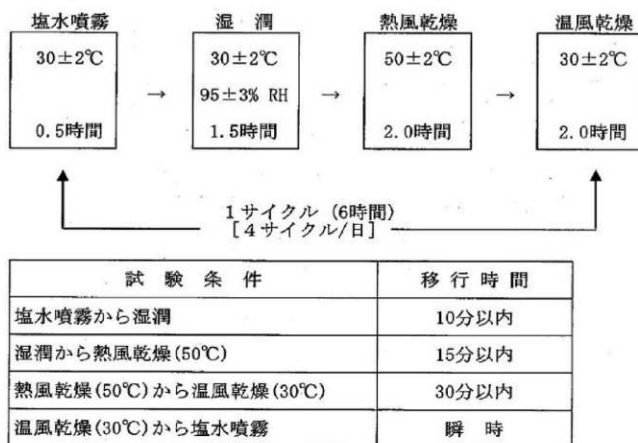


図-1 複合サイクル試験条件



写真-2 複合サイクル試験機

複合サイクル試験は、スガ試験機 CYP-90 (写真-2) を使用した。試験体設置方法は、JIS に規定されている鉛直に対して  $20 \pm 5^\circ$  に従い、鉛直に対して保持角  $15^\circ$  の等間隔配置とした。また、試験体の設置場所は 168 時間を 1 周期としてローテーションし、試験体の配置による環境条件の違いができるだけ生じないように配慮した。なお、この試験体ローテーション時に、試験体を試験機より取出し試験機内を水で洗浄、乾燥させ付着した塩分を清掃し試験を行った。

試験期間は、素地調整 3 種の試験片は 2,160 時間 (約 3 ヶ月、360 サイクル)、素地調整 1 種の試験片は 4,320 時間 (約 6 ヶ月、720 サイクル) として、1 周期毎に外観確認、720 時間毎 (約 1 ヶ月、120 サイクル) に、クロスカット幅の測定を行った。

### (2) 試験片

今回の試験は、既設構造物の腐食箇所を塗装塗替することを想定しており、通常の製作加工したさびがない試験片を用いても現場条件と異なる。そのため、試験片は複合サイクル試験にて腐食させ、ディスクグラインダで素地調整をしたものを用いた。なお、ディスクグラインダによる素地調整では完全にさびの除去は出来ないため、これが原因で耐久性が大きく低下することが分かっている。さびが若干残る試験片の再現化、特に腐食による凹部は完全にさびが取りきれないため、凹凸試験片を製作して試験を行った。

試験は、さびによる影響も比較確認するため、1種ケレン（ブラスト処理）した標準及び凹凸試験片、3種ケレンした標準及び凹凸試験片の4種類を用いて実施した。

### 1) 標準試験片

試験片の形状は、仕様書及び JIS K 5600-1-4 に準じたブラスト処理鋼板（150×70×3.2mm）とした。（図-2）

### 2) 凹凸試験片（仮想腐食加工）

腐食による凹凸の再現は、腐食促進（複合サイクル試験）では相当な期間を要することや同一条件の試験片が設定できないため、円錐ドリルにより仮想腐食（凹凸）を加工した。（図-3）

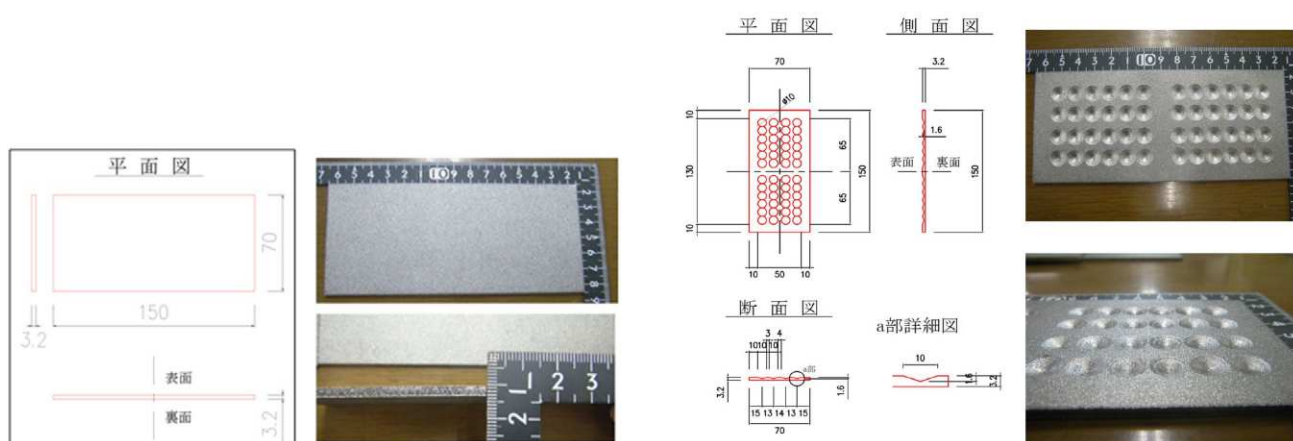


図-2 標準試験片

図-3 仮想腐食（凹凸）試験片

### 3) 腐食促進

標準及び凹凸試験片をブラスト処理し、これを複合サイクル試験にて1ヶ月間腐食促進を実施し、錆試験片を製作した。（写真-3）



写真-3 腐食促進状況と腐食試験片

#### 4) 素地調整

腐食促進した試験片は、2 ケースの素地調整状態とした。ケース 1 (素地調整 1 種) は、ブラスト処理を使用したもの。ケース 2 (素地調整 3 種) は、現場施工同様にディスクグラインダ、カップブラシ等の電動工具を使用したもの。(写真-4) 素地調整後の状況を写真-5、6 に示す。



写真-4 素地調整 3 種の施工状況

|          | 標準試験片 | 凹凸試験片 |
|----------|-------|-------|
| 素地調整 1 種 |       |       |
| 素地調整 3 種 |       |       |

写真-5 素地調整後の試験片

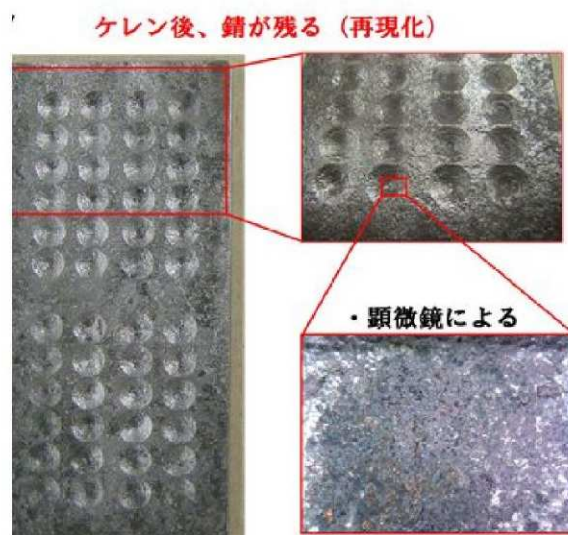


写真-6 凹凸試験片拡大写真

ケース 2 (素地調整 3 種) は、通常のブラスト処理板と比較すると、目視でもさびが分かるくらいで

あった。凹凸試験片（仮想腐食加工）については、顕微鏡で確認するとさびが残っているのが分かる状況であった。現場においてもこのような状況となっているため、現場条件に近似した状況を再現できたと考えている。

（3）省工程防食材料

試験体となる省工程防食材料は、東京西局管内で使用実績のある 5 種類の塗料と使用実績のないセラミック粉末入りエポキシ樹脂塗料を使用した。（表-2）

表-2 供試塗料

| NO | 省工程防食材料           | 試験体                   |       |                       |       |
|----|-------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
|    |                   | 素地調整1種<br>(試験4,320時間) |       | 素地調整3種<br>(試験2,160時間) |       |
|    |                   | 標準試験片                 | 凹凸試験片 | 標準試験片                 | 凹凸試験片 |
| A  | 無機質・無溶剤塗料         | ○                     | ○     | ○                     | ○     |
| B  | 高純度亜鉛系塗料          | ○                     | ○     | ○                     | ○     |
| C  | マグネタイト塗料A         | ○                     | ○     | ○                     | ○     |
| D  | エポキシアルミニウム塗料      | ○                     | ○     | ○                     | ○     |
| E  | マグネタイト塗料B         | ○                     | ○     | ※1                    | ○     |
| F  | セラミック粉末入りエポキシ樹脂塗料 | ○                     | ○     | ○※2                   | ○※2   |

※1 試験機の配置可能数量から試験を省略

※2 セラミック粉末入りエポキシ樹脂塗料(改良版), 試験時間4,320時間

3. 試験結果

複合サイクル試験した後の評価項目は、外観（さび、はがれ、われ、ふくれ）、カット幅、塗膜付着力にて評価を行った。

（1）外観

外観状況は、日本鋼構造協会の鋼橋塗膜調査マニュアルに示されている塗膜の目視調査評価方法に従って、さび、われ、はがれ、ふくれの 4 項目で評価を行った。

1) さび

さびの評価は、図-4 に従って目視にて等級を決定した。試験結果を図-5 に示す。

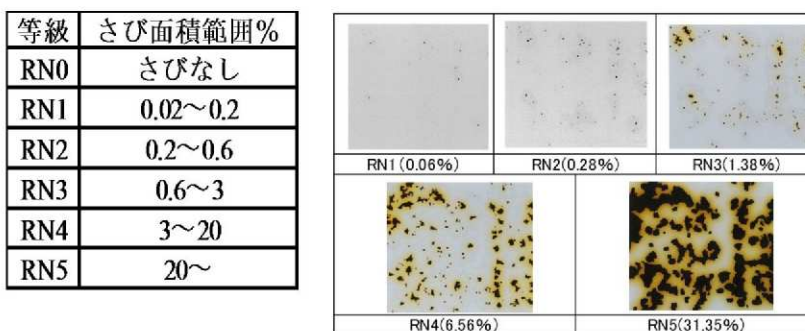
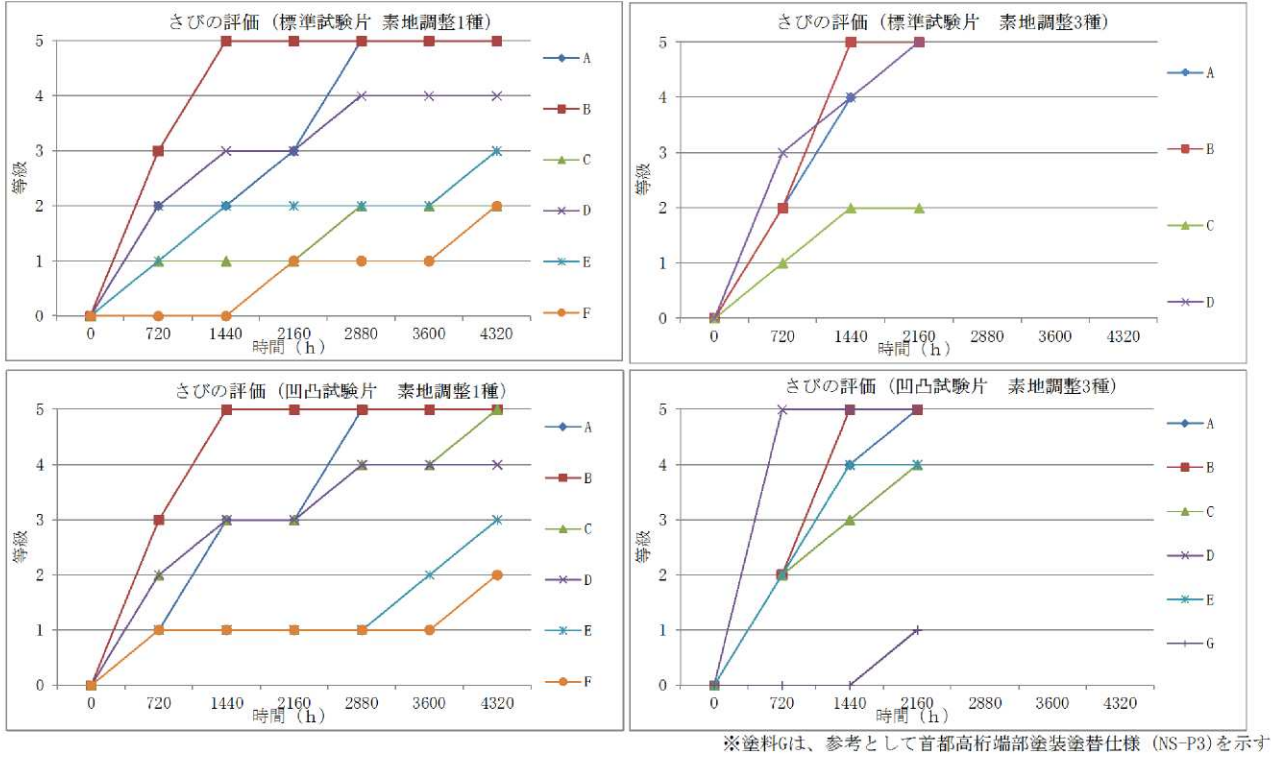


図-4 さび評価の等級と発錆程度



※塗料Gは、参考として首都高桁端部塗装塗替仕様 (NS-P3) を示す

図-5 さび評価結果

4,320 時間において、セラミック粉末入エポキシ樹脂塗料 (F) の標準・凹凸試験片ともに等級 2 以下であった。その他塗料の多くは、1,440 時間を超えると等級 3 以上となり試験片全体にさびが発生した。また、素地調整 1 種、3 種を 2,160 時間において比較すると、無機質・無溶剤塗料 (A)、エポキシアルミニウム塗料 (D) が素地調整 1 種において等級 3 に対し、素地調整 3 種では等級 5 であり素地調整 3 種の方がさびの進行が早く、素地調整時の残存さびの影響が寄与しているものと考えられる。

2) はがれ

はがれの評価は、図-6 に従いはがれの面積にて等級を決定した。代表して凹凸試験片の結果を図-7 に示す。

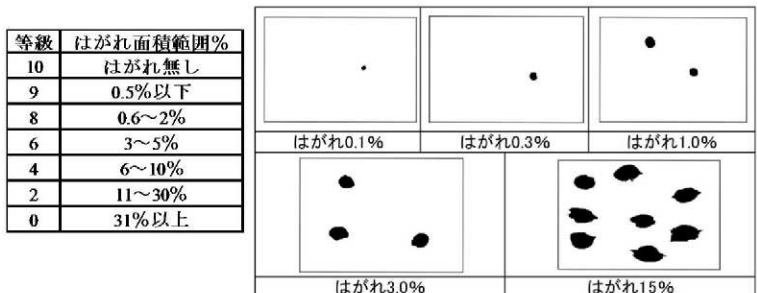


図-6 はがれ評価の等級とはがれ程度

セラミック粉末入エポキシ樹脂塗料（F）は等級 8 に対し、その他塗料は 720 時間を超えると等級が下がる傾向を示した。

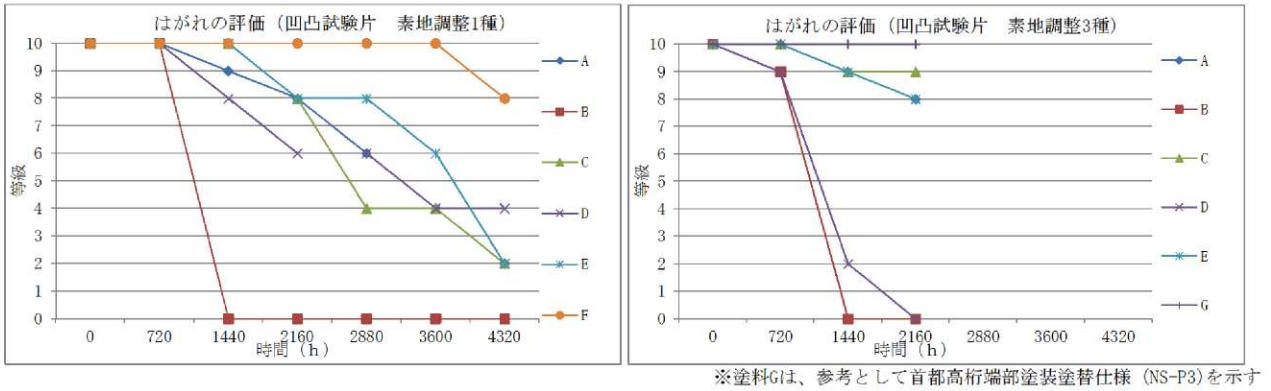


図-7 はがれ評価結果

3) われ

われの評価は、図-8 に従い基準図版にて等級を決定した。代表して凹凸試験の結果を図-9 に示す。マグネタイト塗料 B (E)、セラミック粉末入エポキシ樹脂塗料 (G) は等級 8 以上で良い結果であった。

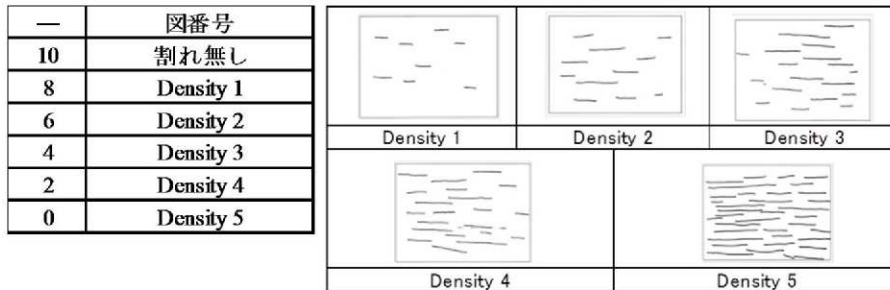


図-8 われ評価の等級とわれ程度

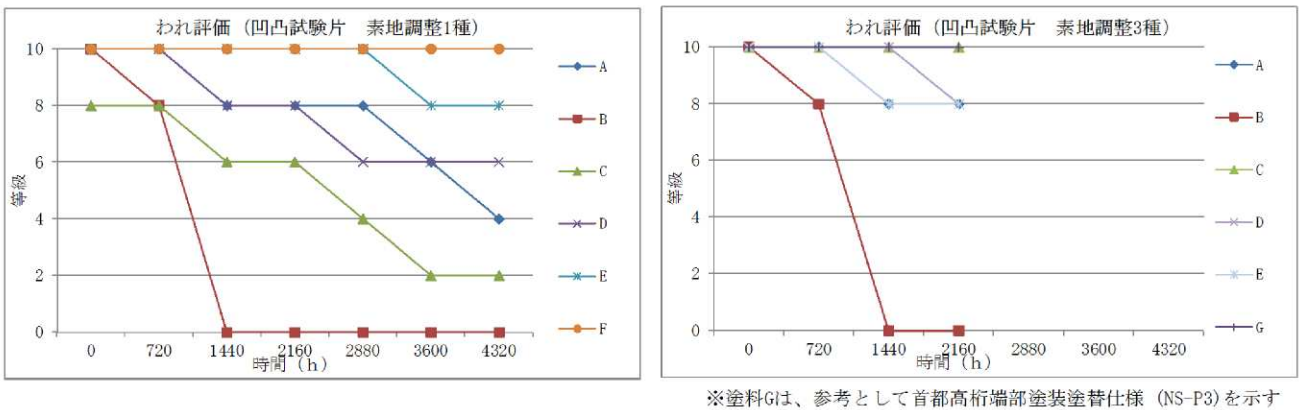


図-9 われ評価結果

4) ふくれ

ふくれの評価は、図-10 に従いふくれの大きさにより評価を行った。代表して凹凸試験の結果を図-

11 に示す。4,320 時間でセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料 (F) はふくれが発生せず最も良い結果であった。

| 等級 | 大きさ         |
|----|-------------|
| 10 | 膨れ無し        |
| 8  | 径約0.1mm以下   |
| 6  | 径約0.2~0.5mm |
| 4  | 径約0.6~1mm   |
| 2  | 径約2~3mm     |
| 0  | 径約4mm以上     |

図-10 ふくれ評価基準

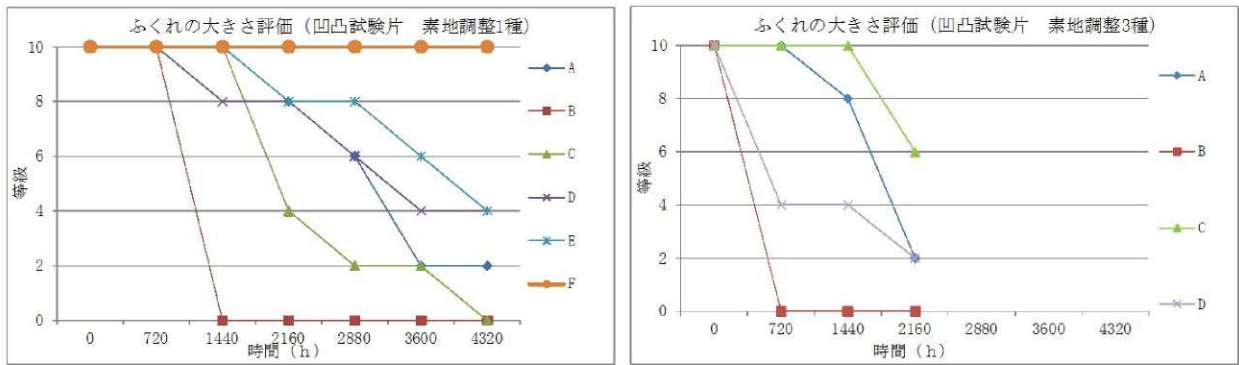


図-11 ふくれ評価結果

(2) カット部からの劣化幅

試験片に設置したクロスカット部からの劣化幅を図-12に示す。カット幅は、4,320時間でセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料 (F) がほぼ変化がなく良い結果であった。その他塗料は、2,160時間経過後にカット幅が大きくなる傾向を示した。

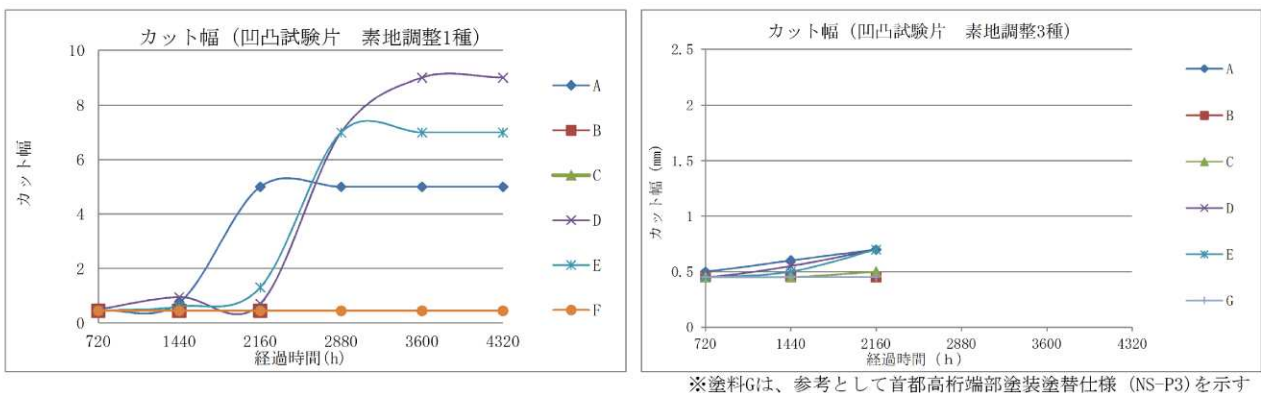


図-12 カット部からの劣化幅の評価結果

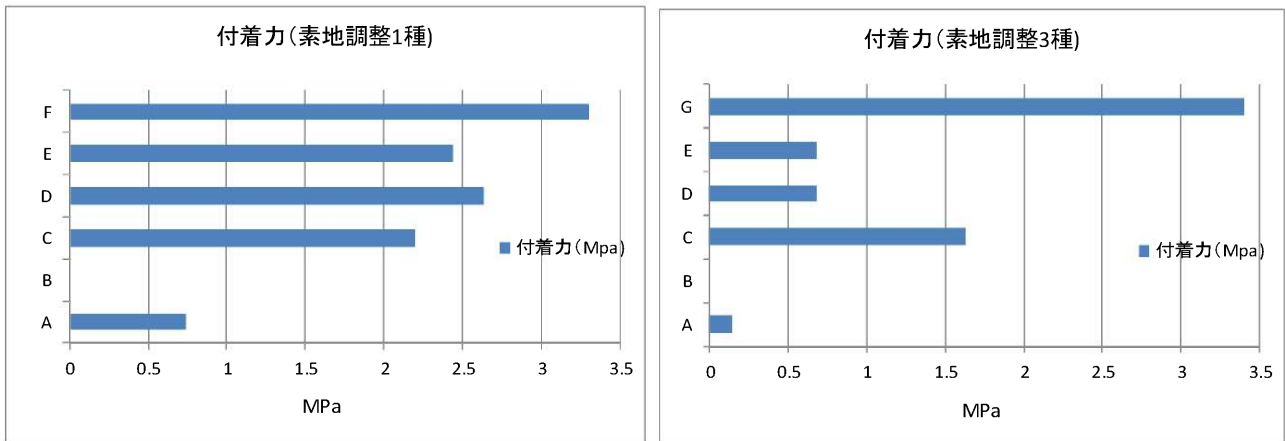
(3) 塗膜付着力

塗膜付着力試験は、複合サイクル試験終了後にアドヒージョンテストにより定量的に計測し、図-13に従って評価を行った。アドヒージョンテスト結果を図-14に示す。



| 引張付着力 (MPa)        |
|--------------------|
| $2.0 \leq X$       |
| $1.0 \leq X < 2.0$ |
| $0 < X < 1.0$      |
| $X = 0$            |

図-1 3 付着力の評価基準



※塗料Gは、参考として首都高桁端部塗装塗替仕様 (NS-P3) を示す

図-1 4 塗膜付着力結果

素地調整 3 種は首都高塗装塗替仕様 (G) 以外は 2.0MPa 以下であった。素地調整 1 種は、塗料 C、D、E、F が 2.0MPa 以上あり付着力が大きい結果であった。残さびの影響により、素地調整 3 種の省工程防食材料は付着力が落ちたと考えられる。

(4) 試験結果のまとめ

弊社における複合サイクル試験の塗膜品質判定基準は表-3にて規定されている。今回試験では、大半の塗料がサイクル数 30 日 (720 時間) においては塗膜に異常がなく、さび・ふくれ幅が 4.0 mm 以下となっており、この規定に従うと今回の省工程防食材料は規定をクリアしている。しかし、サイクル数 30 日経過後に耐久性が落ちる材料がほとんどであった。このような中で、セラミック粉末入エポキシ樹脂塗料 (F) はサイクル数 30 日経過後も耐久性が落ちることなく耐久性に優れた材料であることが確認できた。

表-3 品質判定基準

|               |    |      | サイクル数          | 判定基準          |
|---------------|----|------|----------------|---------------|
| エポキシ系<br>下塗塗料 | 単膜 | 一般部  | 30日<br>(720時間) | 塗膜に異常がないこと    |
|               |    | カット部 |                | さび・膨れ幅4.0mm以下 |

### 3. セラミック粉末入エポキシ樹脂塗料の改良

#### (1) 塗料改良概要

今後の小規模塗装塗替は、複合サイクル試験にて良好な結果を示したセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料を使用することとし、施工性の確認を行った。

本塗料は、無溶剤型の超厚膜型エポキシ樹脂塗料であり、1層で 1,000 $\mu$ m 以上も塗布でき、エポキシ樹脂の耐防食性とセラミック粉末の耐摩耗性を両立した塗料である。表-4 に塗料製品情報を示す。

本塗料は、主にポンプ内、船首等に使用されてきたが、弊社における施工実績はないため施工性の確認を実施した。その結果、可使時間が短い等の施工上の課題が確認された。これら課題を解決するため、主剤・硬化剤の配合比率を変化させる等の施工性を考慮した塗料改良を実施した。表-5 に施工上の課題と塗料改良後の状況を示す。

表-4 塗料製品情報

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| 可使時間(25°C) | 20分                       |
| 硬化時間(25°C) | 16時間                      |
| 耐熱温度       | 180°C                     |
| 発火点        | 無し                        |
| 引火点        | 主 剤 204.4°C<br>硬化剤 93.3°C |
| 消防法        | 主 剤 指定可燃物<br>硬化剤 危4類3石    |

表-5 施工上の課題と改良状況

|         | 施工上の課題          | 塗料改良後     |
|---------|-----------------|-----------|
| ① 塗料粘性度 | 粘性度が高く刷毛塗りに適さない | 刷毛塗り可能    |
| ② 可使時間  | 20分と短い          | 50~60分に改善 |
| ③ 硬化時間  | 16時間と長い         | 8時間に改善    |

塗料改良に伴い耐久性に変化を生じている可能性があるため、複合サイクル試験にて耐久性の確認を実施した。

#### (2) 複合サイクル試験

複合サイクル試験は、2. (1)、(2) と同様な方法で実施した。試験時間等の試験条件は以下のとおりである。試験時間は 4,320 時間 (6 ヶ月)。試験片は標準試験片 2 片と凹凸試験片 2 片 (素地調整 3 種)。複合サイクル試験結果による外観状況 (抜粋) を写真-7、ふくれ、われ、はがれを図-14 に示す。外観写真のとおり、標準試験片 1 片のみが 720 時間 (1 ヶ月) からクロスカット部のさびが確認されたが、4,320 時間までにはがれ、われは生じることなく、試験後のアドヒージョンテストの結果も最小値が 3.37MPa であり、塗料改良前から耐久性が劣ることはなかった。よって、今後の小規模塗装塗替は表-6 に示す仕様で施工を実施する予定である。

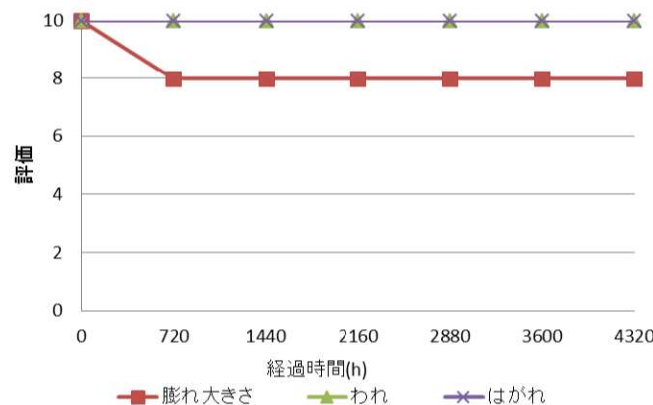


図-14 複合サイクル試験結果

表-6 小規模塗装塗替仕様

| 工程 | 塗料名                  | 塗料規格         | 使用量<br>g/m <sup>2</sup> | 回数 | 塗装<br>方法 | 塗装<br>間隔 |
|----|----------------------|--------------|-------------------------|----|----------|----------|
| 下塗 | セラミック粉末入<br>エポキシ樹脂塗料 | -            | 1,000                   | 1  | はけ       | 8時間~     |
| 上塗 | 厚膜型ポリウレタン<br>樹脂塗料上塗  | SDK<br>P-432 | 230                     | 1  |          |          |



写真-7 外観状況

#### 4. まとめ

小規模な腐食損傷箇所への補修に、より耐久性のある省工程防食材料を適用することを目的として耐久性比較検証試験を実施した。試験は複合サイクル試験にて実施した結果、これまで使用してきた省工程防食材料よりも、弊社では使用実績のないセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料の耐久性が良いことが確認された。

本試験にて選定されたセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料は、刷毛塗りに適さず、可使時間も短く施工性に課題を有していたが、塗料改良を行うことで施工性の改善を図った。また、改良塗料の耐久性試験を実施し、改良に伴い大きく耐久性に変化が生じていないことを確認した。

今後、改良したセラミック粉末入エポキシ樹脂塗料にて、小規模腐食損傷の塗装塗替を実施し、経過観察することでその耐久性の確認を引き続き実施していく予定である。